昆虫学报 Acta Entomologica Sinica, May 2012, 55(5): 535 - 544 ISSN 0454-6296

化学元素用于识别褐飞虱不同地理种群的可行性研究

缪清玲[1], 吴加伦[1], 唐启义[1,*], 程家安[1], 傅 强[2]
(1. 浙江大学昆虫科学研究所, 杭州 310029; 2. 中国水稻研究所, 杭州 310006)

摘要: 研究褐飞虱 *Nilaparvata lugens* (Stål)不同地理种群成虫体内化学元素组成特点, 筛选出可用于褐飞虱不同地理种群识别的化学元素种类。应用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)半定量分析检测存在于褐飞虱体内的化学元素, 对各元素进行巢式设计方差分析, 初步筛选出地理种群间具有显著差异的元素; 然后对这些元素采用 ICP-MS 全定量分析, 进一步筛选、验证地区间差异显著而年份间差异不显著的元素。结果表明, 褐飞虱体内存在 57 种化学元素, 巢式设计方差分析筛选出了地区间具有显著性差异的 27 种元素。随后的 ICP-MS 全定量分析及统计检验, 筛选出各地理种群都存在而含量不同的 Ce, Nd, Pr, Sm, Gd, Th, V, Tl, Mo, Cs, Fe 和 Mn 12 种元素。不同地理种群褐飞虱成虫体内的一些化学元素含量存在着显著差异, 有助于褐飞虱远距离迁入虫源地的识别研究, 可为追溯褐飞虱地理来源提供新的方法。

关键词: 褐飞虱; 地理种群; 化学元素; 半定量分析; 全定量分析
中图分类号: Q968 **文献标识码**: A **文章编号**: 0454-6296(2012)05-0535-10

Feasibility of recognizing different geographic populations of the brown planthopper, *Nilaparvata lugens* (Hemiptera: Delphacidae), using chemical elements

MIAO Qing-Ling[1], WU Jia-Lun[1], TANG Qi-Yi[1,*], CHENG Jia-An[1], FU Qiang[2] (1. Institute of Insect Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China; 2. China National Rice Research Institute, Hangzhou 310006, China)

Abstract: The objective of this research was to study the composition of chemical elements and screen out the kinds of chemical elements with geographical characteristics in the body of adults of the brown planthopper (BPH), *Nilaparvata lugens* (Stål), in different geographic populations. Semi-quantitative analysis of inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) was employed to determine the content of chemical elements existing in the body of adult BPH, and the differences in content of chemical elements among geographical populations were tested by means of analysis of variance (ANOVA) with nested design. Furthermore, full-quantitative analysis of ICP-MS and ANOVA with nested design was utilized to screen and verify the chemical elements which had significant differences among geographical populations but had no significant difference between years. The results showed that there were 57 chemical elements in body of adult BPH, and 27 kinds of chemical elements were filtered out by nested design ANOVA. Twelve elements (Ce, Nd, Pr, Sm, Gd, Th, V, Tl, Mo, Cs, Fe and Mn), which can be used to discriminate geographical origins of BPH, were screened out by means of ICP-MS full-quantitative detection analysis and nested design ANOVA. There are significant differences in content of some chemical elements among different geographical populations of BPH, which would contribute to recognizing the origin of long-distance immigration of BPH, and providing probably a new way to trace back geographic origins of BPH.

Key words: *Nilaparvata lugens*; geographical population; chemical element; semi-quantitative analysis; full quantitative analysis

基金项目: 国家重点基础研究发展规划("973"计划)项目(2010CB126200); 国家高技术研究发展("863"计划)项目(2006AA10Z217); 农业部公益性行业科研专项(200803003)
作者简介: 缪清玲, 女, 1986 年 5 月生, 山东菏泽人, 硕士研究生, 研究方向为农业昆虫与害虫防治, E-mail: miaoqingling211@sohu.com
* 通讯作者 Corresponding author, E-mail: qytang@zju.edu.cn
收稿日期 Received: 2012-01-10; 接受日期 Accepted: 2012-05-10

褐飞虱 *Nilaparvata lugens*（Stål）是我国及东南亚国家水稻上的一种具有远距离迁飞特性的重要害虫。褐飞虱直接吸食水稻韧皮部汁液，或传播水稻病毒病，对我国水稻生产造成巨大的损失，其暴发性及毁灭性的特点为预测预报带来了很大的难度。

自从 1967 年发现褐飞虱具有迁飞特性以来（Asahina and Tsuruoka，1968），探索褐飞虱远距离迁飞规律的方法和技术逐步改善。自 20 世纪 70 年代起，我国学者分别采用了高山网捕、标记重捕、空中航捕、海上航捕等方法对褐飞虱迁飞规律进行了大量研究，证实了褐飞虱夏季由南向北、秋季又由北向南的远距离迁飞规律（陈世煌等，1978；张灿东，1980；邓望喜，1981；刘浩光等，1983）。20 世纪 80 年代以来，又利用雷达遥感和轨迹分析相结合的方法对褐飞虱迁飞特征进行了研究，以追溯过境迁飞种群来源地及可能降落的范围，从而建立预警系统、进行预测预报（程遐年等，1994；包云轩等，2000，2005）。

网捕和标记重捕法耗费人力物力较大，效率较低。雷达遥感技术并不能直接地分辨出昆虫种类，需要其他方法协助。轨迹分析同时要考虑到诸多环境因素，如迁飞时的气象条件，褐飞虱自身生理、生物学特性，水稻营养状况等。各个因素综合起来才能较好地模拟和预测褐飞虱迁出、空中迁飞路径和降落区域。但由于轨迹分析得到的仅是褐飞虱迁飞的模拟路线，因此，这些追踪方法难以追踪褐飞虱迁入虫源地的地点。

追踪害虫来源地对害虫预测预报及综合防治具有重要意义。因此，寻找能识别害虫地理来源的技术非常重要。应用有机体内的化学元素的组成追溯其地理来源已广泛用于多种食品研究。根据食物的化学元素组成建立的一系列模式识别技术已用来确定食物的地理来源（Szefer and Nriagu，2007），并已证明稳定同位素比率和多元素数据是精确确定地理来源的较好方法（Aparicio，1999）。如稻米（Yasui and Shindoh，2000；Kelly *et al.*，2002）、土豆（Anderson *et al.*，1999；Rivero *et al.*，2003；Di Giacomo *et al.*，2007）、茶叶（Lamble and Hill，1995；Marcos *et al.*，1998；Moreda-Piñeiro *et al.*，2003）、肉类（Franke *et al.*，2005；Sacco *et al.*，2005；Heaton *et al.*，2008）、蜂蜜（Devillers *et al.*，2002；Nozal Nalda *et al.*，2005；Fernández-Torres *et al.*，2005；Tuzen *et al.*，2007；Pisani *et al.*，2008）等可根据化学元素来确定地理来源。褐飞虱体内的化学元素是从其生活环境中获得的，不同地区的土壤组成及环境条件不同，褐飞虱体内化学元素的地理特征亦可作为辨别其地理来源的天然标记。

相对于我国目前褐飞虱研究迁飞的宏观技术，本研究从微观上研究褐飞虱不同地理种群化学元素组成差异，通过检测褐飞虱不同地理种群生物体内化学元素含量，结合统计分析确定具地理种群特征的化学元素，从微量和痕量水平上对褐飞虱迁飞虫源地特征进行阐释，加深褐飞虱迁飞规律研究，对进一步提高褐飞虱的异地预测预报与可持续治理都具有重要意义。同时也为其他具有远距离迁飞特性的农林植物病虫[如小麦条锈病 *Puccinia striiformis* West. f. sp. *tritici* Eriks *et* Henn、稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medinalis*（Guenee）]类似研究提供技术借鉴。

1 材料和方法

1.1 供试虫源

根据褐飞虱在我国南方水稻区迁飞规律，分别于 2006 – 2008 年 9 – 10 月在浙江永康，湖南衡阳，广西玉林、全州、合浦、永福，湖北潜江，福建福清，广东韶关及江西万安、宜丰等地区晚稻灌浆-乳熟期、褐飞虱本地成虫高峰期分别取 3 个丘块作为样品采集点采集长翅成虫（表 1）。采集的褐飞虱样品立即冷冻致死，室温下风干，然后放入离心管中 –20℃保存。

1.2 分析仪器和试剂

Agilent 7500A 电感耦合等离子体质谱仪（Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry，ICP-MS），八级反应体系（Octopole Reaction System，ORS），日本横河公司 Yokogawa Analytical Systems Inc.。分析样品时 ICP-MS 的工作条件为：Rf 功率为 1 250 W，等离子气体流量为 15.0 L/min，辅助气流量为 1.06 L/min，样品提升率为 0.1 rps，BS124S 分析天平（德国赛多利斯 Sartorius），高温高压消解罐和聚四氟乙烯瓶（50 mL，滨海县正红塑料厂）；DGX-9143B 型电子数字控温风干箱（上海福马实验设备有限公司）；65% HNO_3 和 30% H_2O_2 为优级纯或以上级别（北京化工总厂生产）；实验中所用的水均经过 Millipore 超纯水装置（MILLI-Q ELEMENT A10 系统，美国密西理博公司生产）处理过的去离子水。

1.3 样品前处理

用少量无离子超纯水清洗褐飞虱样品，常温下

表 1　褐飞虱样品采样点分布(2006－2008)

Table 1　Distribution of sampling points of the brown planthopper, *Nilaparvata lugens*, during 2006－2008

地点 Locality	采样点 Sampling point (village)	纬度 Latitude	经度 Longitude
福建福清 Fuqing, Fujian	洪山村 Hongshan	25°55′35″ N	119°27′71″ E
	棉亭村 Mianting	25°53′34″ N	119°27′35″ E
湖北潜江 Qianjiang, Hubei	蔡湖村 Caihu	30°26′32″ N	112°55′06″ E
湖南衡阳 Hengyang, Hunan	白水村 Baishui	26°29′34″ N	114°46′09″ E
	竹塘村 Zhutang	26°49′04″ N	112°29′43″ E
江西万安 Wan' an, Jiangxi	光明村 Guangming	28°53′49″ N	120°06′30″ E
江西宜丰 Yifeng, Jiangxi	港口村 Gangkou	28°53′49″ N	120°06′30″ E
广东韶关 Shaoguan, Guangdong	西联村 Xilian	24°45′32″ N	113°32′02″ E
广西合浦 Hepu, Guangxi	下洋村 Xiayang	24°41′21″ N	109°08′01″ E
	莲北村 Lianbei	21°40′27″ N	109°11′40″ E
广西全州 Quanzhou, Guangxi	绕山村 Raoshan	25°56′48″ N	111°05′54″ E
广西永福 Yongfu, Guangxi	渔洞村 Yudong	25°02′36″ N	110°00′55″ E
	塘堡村 Tangbao	25°02′36″ N	110°00′55″ E
广西玉林 Yulin, Guangxi	葵阳村 Kuiyang	22°43′17″ N	109°50′03″ E
	良厚村 Lianghou	24°45′32″ N	113°32′02″ E
	六平村 Liuping	21°40′27″ N	109°11′40″ E
浙江永康 Yongkang, Zhejiang	上杨村 Shangyang	28°53′49″ N	120°06′30″ E
	井头村 Jingtou	28°54′17″ N	120°11′23″ E
	花街村 Huajie	28°55′24″ N	119°57′52″ E

干燥。用万分之一的分析天平，准确称取 0.2000 g 虫体样品，放入消化瓶中。各加 4 mL 浓硝酸，0.5 mL H_2O_2，放入消化罐，盖紧罐盖，放入烘箱 120℃ 2 h，再 160℃ 8 h。稍冷取出，用超纯水多次洗涤，过滤到 50 mL 离心管中，定容到 50 mL。每个丘块采集的样品 3 次重复，前处理中设空白对照 3 个。完成后立即送样进行 ICP-MS 测定。

1.4　数据统计与分析

本实验所得数据应用 DPS 统计软件(唐启义，2010)中的一般线性模型进行巢式设计方差分析，根据分析结果中的 F 统计量和相应概率 P 值判断各元素在地区间的差异显著性。半定量分析和全定量分析都是按照巢式设计，即地点间均方(MS_L)与年份间(MS_Y)和丘块间(MS_B)之和的均方的比值计算方差分析 F 统计量，$F = MS_L/(MS_Y + MS_B)$，计算相应的概率 $P_{L(YB)}$ 值，以检测化学元素在不同地理种群间是否存在显著性差异。

2　结果与分析

2.1　褐飞虱体内化学元素的分布与特征

应用 ICP-MS 半定量分析技术对 2006 年褐飞虱样品检测了元素周期表中 75 种元素，在褐飞虱体内共检测出 57 种化学元素(表 2)。在这 57 种元素中，Mg，Al，Fe，Ca，Zn，Mn，Ba，Ti，Cu，Cr，Rb，Pb，Ni，Br，Sr 和 Mo 元素的平均含量在 1 μg/g 以上，其中 Br 元素是唯一的非金属元素，其他元素都分布在金属元素范围内，且有 1/2 的元素属于过渡金属元素；而元素平均含量在 0.1～1 μg/g 之间是 B，Ag，Sb，Cd，Ga，Ce，Sn，As，Zr，Li，La，I，V，Nd 和 Co 元素，除了 B，As 和 I 是非金属元素，其他元素都是金属元素，且包含了两个镧系元素 La 和 Ce；还有 Se，Y，Th，Cs，Nb，Pr，W，Sm，U，Dy，Hg，Gd，Sc，Ge，Bi，Er，Hf，Yb，Eu，Tl，Ho，Be，Tm 和 Lu 元素，平均含量在 0.001～0.1 μg/g 之间，除 Se 是非金属以外，全都是金属元素，且 Pr，Sm，Eu，Gd，Dy，Ho，Er，Tm，Yb，Lu，Sc 和 Y 是稀土元素，数量占到了 1/2；Pd 和 Pt 两元素平均含量小于 0.001 μg/g，超出了仪器检测限范围 10^{-6}～10^3 μg/g。

2.2　不同地理种群褐飞虱体内元素特征差异的统计分析

2006－2007 年褐飞虱样品 ICP-MS 半定量分析检测出的 K，Ca，Mg，P 和 B 元素，考虑到可能受水

表 2 褐飞虱体内化学元素含量均值(μg/g)

Table 2 Average content (μg/g) of chemical elements in the brown planthopper, *Nilaparvata lugens*

元素 Element	含量 Content	元素 Element	含量 Content	元素 Element	含量 Content
Mg	499.2647	Cd	0.8177	Sm	0.0351
Al	207.5294	Ga	0.8174	U	0.0284
Fe	205.5882	Ce	0.6403	Dy	0.0271
Ca	105.2941	Sn	0.3853	Hg	0.0248
Zn	42.1176	As	0.3697	Gd	0.0242
Mn	33.4235	Zr	0.3521	Sc	0.0218
Ba	21.2324	Li	0.3350	Ge	0.0182
Ti	13.3912	La	0.2921	Bi	0.0167
Cu	11.7647	I	0.2456	Er	0.0163
Cr	11.0000	V	0.2125	Hf	0.0098
Rb	10.8553	Nd	0.1878	Yb	0.0084
Pb	5.4382	Co	0.1568	Eu	0.0072
Ni	4.6029	Se	0.0988	Tl	0.0062
Br	2.9794	Y	0.0941	Ho	0.0049
Sr	2.5029	Th	0.0891	Be	0.0020
Mo	1.5024	Cs	0.0883	Tm	0.0012
B	0.9412	Nb	0.0607	Lu	0.0012
Ag	0.8438	Pr	0.0517	Pd	0.0008
Sb	0.8224	W	0.0391	Pt	0.0002

稻种植时所施肥料影响，故没有进行统计检验。其他52种化学元素，应用一般线性模型方法，进行地点间/年份间×丘块间巢式设计方差分析，得到结果如表3。

褐飞虱不同地理种群体内化学元素的方差分析结果表明：同时满足地区间 $P_E<0.05$ 和地点间均方(MS_E)与年份间(MS_A)和丘块间(MS_D)之和的均方比值 F，$F = MS_E/(MS_A + MS_D)$ 的概率 $P_{E(AD)}<0.05$ 的化学元素有27种，它们分别是Mn，Mo，Cd，Ce，V，Th，Cs，Be，Tl，Fe，Nd，Pr，Se，Li，Bi，Tm，Lu，Eu，Ho，Br，Dy，Y，La，Gd，U，Sm和Ti，可以初步认为这些元素在不同地理种群间存在显著差异。

这27种化学元素，在进行ICP-MS全定量检测时，因元素Li和Bi须作为标样，Y和La在半定量检测中含量极低没有继续检测，所以只对其余的23种化学元素进行了全定量检测，并应用DPS软件进行了类似之前的半定量分析的地点内/年份间×丘块间巢式设计方差分析，分析结果如表4所示。

不同地理种群褐飞虱体内化学元素全定量检测结果方差分析表明：同时满足地区间 $P_L<0.05$ 和地点间均方(MS_L)与年份间(MS_Y)和丘块间(MS_B)之和的均方比值 F 概率 $P_{L(YB)}<0.05$ 的化学元素有Mn，Cd，Ce，V，Th，Cs，U，Be，Tl，Mo，Fe，Nd，Pr，Sm，Se和Gd，这些元素在不同地理种群褐飞虱体内存在显著性差异。其中元素U和Be(P_Y 值分别为0和0.0007)在年份间差异显著；Cd和Se(P_B 值分别为0.0151和0.0071)元素在重复丘块间差异显著。因此，符合在不同地理种群褐飞虱体内存在显著差异且在年份和区块间不存在显著差异的化学元素有Mn，Ce，V，Th，Cs，Tl，Mo，Fe，Nd，Pr，Sm和Gd。

分析结果表明，全定量检测和半定量检测结果接近：元素Mn，Ce，V，Th，Cs，Tl，Mo，Fe，Nd，Pr，Sm和Gd在不同地理种群褐飞虱间存在显著性差异，而在不同年份间与重复丘块间差异不显著。而在全定量分析中，元素Ho，Lu，Eu，Tm和Br则没有像半定量分析中那样表现出不同地理种群间的显著性差异。

表 3　不同地理种群褐飞虱体内化学元素方差分析(2006 –2007)

Table 3　Variance analysis of chemical elements in different geographical populations of the brown planthopper, *Nilaparvata lugens*, between 2006 and 2007

元素 Element	F_L	P_L	F_Y	P_Y	F_B	P_B	$P_{L(YB)}$
Cd	28.7244	0.0000	88.1858	0.0000	8.8434	0.0001	0.0000
V	22.2449	0.0001	0.0191	0.8914	0.5183	0.8686	0.0001
Se	20.0481	0.0001	0.0300	0.8643	0.1549	0.9986	0.0001
Li	18.0194	0.0002	2.9921	0.0991	0.5489	0.8465	0.0003
Mn	18.1336	0.0002	7.6681	0.0118	0.4651	0.9036	0.0003
Th	13.8903	0.0008	3.8386	0.0642	0.6093	0.7998	0.0009
Bi	13.7532	0.0008	3.7049	0.0686	0.6767	0.7442	0.0010
Fe	13.1286	0.0010	5.2045	0.0336	0.7545	0.6780	0.0013
Tm	11.7450	0.0015	1.9818	0.1746	0.4467	0.9147	0.0014
Lu	11.2770	0.0018	5.0892	0.0354	1.1999	0.3475	0.0046
Be	8.0821	0.0060	0.6926	0.4151	0.6296	0.7833	0.0050
Cs	9.9032	0.0029	6.0842	0.0228	1.0149	0.4684	0.0059
Eu	9.6844	0.0031	5.1833	0.0339	1.1260	0.3925	0.0073
Ho	8.9910	0.0041	6.9193	0.0160	1.1451	0.3804	0.0104
Br	6.9857	0.0097	0.5531	0.4657	1.1440	0.3811	0.0115
Pr	8.4114	0.0052	8.0516	0.0102	1.1385	0.3846	0.0132
Nd	8.2777	0.0055	9.3250	0.0063	1.3474	0.2705	0.0199
Ce	6.9704	0.0098	10.2461	0.0045	1.0411	0.4496	0.0216
Tl	6.2959	0.0135	3.6643	0.0700	0.9804	0.4939	0.0239
Dy	7.6840	0.0071	16.0606	0.0007	1.3057	0.2906	0.0244
Y	8.3896	0.0053	5.8847	0.0249	1.5866	0.1781	0.0259
Mo	6.6598	0.0113	17.9285	0.0004	1.1330	0.3880	0.0292
La	5.9830	0.0158	10.5335	0.0041	0.9851	0.4904	0.0319
Gd	6.5862	0.0117	4.7747	0.0410	1.3431	0.2725	0.0374
U	8.0560	0.0060	9.8417	0.0052	1.6934	0.1474	0.0396
Sm	6.3174	0.0134	6.6238	0.0181	1.3015	0.2927	0.0430
Ti	5.8091	0.0172	13.3964	0.0016	1.1650	0.3682	0.0465
Sc	4.7243	0.0307	0.7172	0.4071	3.1741	0.0121	0.0732
Al	6.9156	0.0101	3.2524	0.0864	2.6585	0.0277	0.0881
As	2.4363	0.1294	5.8599	0.0251	0.2519	0.9887	0.1277
Pb	3.5317	0.0622	12.6214	0.0020	1.1476	0.3789	0.1633
Zr	2.4058	0.1323	24.8763	0.0001	0.6380	0.7764	0.1703
Sn	2.1592	0.1581	1.6882	0.2086	0.8137	0.6278	0.1891
Hf	3.2748	0.0733	14.5111	0.0011	1.1864	0.3553	0.2056
Co	1.3205	0.3032	1.3949	0.2514	0.1967	0.9959	0.2430
Cr	1.4454	0.2739	1.5979	0.2207	0.5148	0.8710	0.2509
I	1.1928	0.3369	1.6655	0.2116	0.2853	0.9816	0.2824
Hg	1.3011	0.3080	1.4611	0.2409	0.7888	0.6488	0.3462
Sr	1.1165	0.3592	11.4007	0.0030	0.2600	0.9872	0.3627
Ni	0.6381	0.5453	1.2905	0.2694	0.5217	0.8662	0.4802
Cu	0.6442	0.5423	1.9777	0.1750	0.4996	0.8814	0.5134
Ge	2.0175	0.1757	6.2019	0.0217	1.2867	0.3002	0.5458
Ag	1.2962	0.3093	1.9646	0.1763	1.3520	0.2684	0.6954
W	0.5449	0.5936	9.4724	0.0059	0.6458	0.7700	0.7650
Er	7.1642	0.0090	19.3396	0.0003	3.2269	0.0111	0.7880
Sb	1.0216	0.3893	16.2321	0.0007	1.0731	0.4274	0.9094
Yb	6.3538	0.0131	9.6008	0.0057	4.3855	0.0021	1.6987
Nb	4.2631	0.0399	37.1690	0.0000	3.5227	0.0071	5.6505
Ga	2.3781	0.1349	12.2575	0.0022	3.7268	0.0052	18.0737
Ba	1.9749	0.1814	13.5328	0.0015	4.8530	0.0011	69.6346
Zn	1.3018	0.3078	19.2310	0.0003	11.6609	0.0000	1 069.6089
Rb	1.9226	0.1887	65.1011	0.0000	7.6268	0.0001	3 621.7637

L: 地点 Locality; *Y*: 年份 Year; *B*: 丘块 Block; *F*: 统计量 Statistics; *P*: 显著概率值 Significant probability. 下同 The same below.

表 4 不同地理种群褐飞虱体内化学元素差异方差分析(2007－2008)

Table 4 Variance analysis of chemical elements in different geographical populations of the brown planthopper, *Nilaparvata lugens*, between 2007 and 2008

元素 Element	F_L	P_L	F_Y	P_Y	F_B	P_B	$P_{L(YB)}$
Mn	2.4035	0.1244	6.8204	0.0000	0.5919	0.6693	0.0000
Cd	0.1849	0.6682	57.1119	0.0000	3.2540	0.0151	0.0000
Ce	0.6350	0.4275	5.5099	0.0000	0.3934	0.8129	0.0000
V	1.0910	0.2989	7.5418	0.0000	0.9597	0.4334	0.0000
Th	0.0894	0.7655	4.8050	0.0000	0.4854	0.7464	0.0000
Cs	2.1906	0.1422	17.3662	0.0000	1.2131	0.3105	0.0000
U	23.9866	0.0000	8.9650	0.0000	1.1647	0.3315	0.0000
Be	12.2371	0.0007	6.1694	0.0000	0.9834	0.4205	0.0000
Tl	2.7836	0.0986	11.3408	0.0000	0.3795	0.8228	0.0000
Mo	0.6033	0.4393	4.3456	0.0001	0.1859	0.9452	0.0001
Fe	1.8112	0.1816	4.1647	0.0001	1.2218	0.3069	0.0002
Se	0.0035	0.9526	3.6259	0.0004	3.7495	0.0071	0.0004
Nd	0.2669	0.6066	2.8427	0.0039	0.1872	0.9446	0.0025
Pr	0.9526	0.3316	2.8478	0.0039	0.3578	0.8380	0.0033
Sm	1.0545	0.3071	2.5663	0.0087	0.3718	0.8282	0.0077
Gd	0.9663	0.3281	2.1063	0.0313	0.3997	0.8084	0.0275
Dy	0.8973	0.3459	1.7062	0.0906	0.5168	0.7235	0.0847
Er	2.7477	0.1007	1.7188	0.0877	0.8942	0.4707	0.1535
Ho	5.3117	0.0234	1.3047	0.2394	2.2140	0.0733	2.4757
Lu	9.1980	0.0031	1.0919	0.3764	2.9251	0.0250	13.3950
Br	5.3856	0.0225	1.1597	0.3278	6.6009	0.0001	14.5044
Eu	8.7130	0.0040	1.3099	0.2366	3.5367	0.0098	17.1449
Tm	9.8193	0.0023	1.2049	0.2980	4.7432	0.0016	76.4103

2.3 不同地理种群褐飞虱体内元素特征

表 5 中，作者列出了 2008 年 10 个不同地理种群褐飞虱体内元素 Mn，Ce，V，Th，Cs，Tl，Mo，Fe，Nd，Pr，Sm 和 Gd 的含量。从表 5 可以看出，同一元素在不同地点间的含量差异明显。

例如元素 Mn 在福清、永康、玉林、全州、衡阳、万安、宜丰、合浦、韶关和永福褐飞虱样品中的平均含量分别为 233.41，156.14，223.54，295.45，202.60，106.96，145.22，224.52，365.99 和 108.49 μg/g，不同地理种群褐飞虱体内含量差异较大，含量最大值是最小值的 3.375 倍。

另一种含量较大的元素 Fe，在地区之间的差异亦较大，最大值的韶关(3 867.32 ± 782.75)是含量较低的永康(621.71 ± 171.55)和宜丰(534.43 ± 104.19)的 6～7 倍。因此，将不同地理种群褐飞虱体内化学元素作为地理来源识别的特征是有意义的。

2.4 半定量测定与全定量测定的相关性比较

为检验 ICP-MS 半定量分析和全定量分析在检测元素含量上的关系，作者对 2007 年褐飞虱样品同时进行了半定量分析和全定量分析。两种方法得到的23 种化学元素含量关系如散点图(图 1)。图 1 可以看出，ICP-MS 半定量和全定量分析，各个元素的相关系数 r 值依次是：Mn(0.9907)，Cd(0.9794)，Fe(0.9777)，Cs(0.9760)，V(0.9663)，Ce(0.8924)，Th(0.8789)，U(0.8789)，Tl(0.8190)，Nd(0.7488)，Pr(0.7030)，Sm(0.6686)，Gd(0.5646)，Br(0.5311)，Dy(0.4478)，Se(0.4270)，Mo(0.3488)，Lu(0.3056)，Er(0.2899)，Be

表 5　2008 年不同地理种群褐飞虱体内化学元素含量(μg/g)

Table 5　Content of chemical elements (μg/g) in different geographical populations of the brown planthopper, *Nilaparvata lugens*, in 2008

元素 Element	福清 Fuqing	永康 Yongkang	玉林 Yulin	全州 Quanzhou	衡阳 Hengyang	万安 Wan' an	宜丰 Yifeng	合浦 Hepu	韶关 Shaoguan	永福 Yongfu
Mn	233.41 ±90.21	156.14 ±42.86	223.54 ±93.07	295.45 ±20.77	202.60 ±64.29	106.96 ±10.82	145.22 ±46.43	224.52 ±71.17	365.99 ±44.28	108.49 ±27.31
Ce	3.32 ±2.37	0.32 ±0.13	2.24 ±1.63	3.20 ±1.87	1.75 ±1.61	0.78 ±0.17	0.32 ±0.19	2.26 ±1.82	10.46 ±2.67	0.89 ±0.69
V	2.61 ±1.67	0.67 ±0.40	3.05 ±2.42	4.91 ±2.77	2.54 ±1.72	0.93 ±0.33	0.74 ±0.23	2.10 ±1.62	8.72 ±1.86	1.48 ±0.99
Th	0.33 ±0.29	0.04 ±0.04	0.25 ±0.22	0.44 ±0.25	0.22 ±0.21	0.06 ±0.05	0.02 ±0.04	0.25 ±0.24	1.67 ±0.40	0.17 ±0.21
Cs	0.20 ±0.12	0.04 ±0.02	0.81 ±0.53	0.87 ±0.54	0.29 ±0.23	0.10 ±0.02	0.15 ±0.06	0.29 ±0.19	2.20 ±0.44	0.1 ±0.07
Tl	0.04 ±0.01	0.01 ±0.01	0.04 ±0.02	0.07 ±0.01	0.04 ±0.02	0.02 ±0.01	0.03 ±0.02	0.04 ±0.01	0.17 ±0.02	0.02 ±0.01
Mo	9.98 ±3.09	6.59 ±1.08	6.53 ±0.83	6.49 ±0.63	3.53 ±1.46	4.22 ±1.75	10.80 ±6.47	4.66 ±1.97	8.54 ±1.92	9.60 ±2.64
Fe	1 552.41 ±815.04	621.71 ±171.55	2 151.19 ±1127.21	2 131.67 ±957.48	1 090.56 ±539.61	1 032.81 ±230.21	534.43 ±104.19	1 337.80 ±1019.32	3 867.32 ±782.75	1 038.16 ±543.24
Nd	1.45 ±1.31	0.15 ±0.07	1.00 ±0.71	1.43 ±0.90	0.65 ±0.58	0.38 ±0.08	0.13 ±0.08	0.87 ±0.62	4.40 ±1.07	0.35 ±0.27
Pr	0.39 ±0.32	0.06 ±0.03	0.28 ±0.18	0.36 ±0.23	0.20 ±0.19	0.13 ±0.04	0.05 ±0.03	0.24 ±0.16	1.15 ±0.26	0.09 ±0.07
Sm	0.26 ±0.21	0.05 ±0.03	0.20 ±0.13	0.26 ±0.16	0.14 ±0.15	0.07 ±0.03	0.04 ±0.02	0.18 ±0.11	0.78 ±0.19	0.06 ±0.05
Gd	0.24 ±0.18	0.05 ±0.03	0.19 ±0.12	0.25 ±0.14	0.14 ±0.14	0.07 ±0.04	0.03 ±0.02	0.17 ±0.11	0.71 ±0.14	0.06 ±0.05

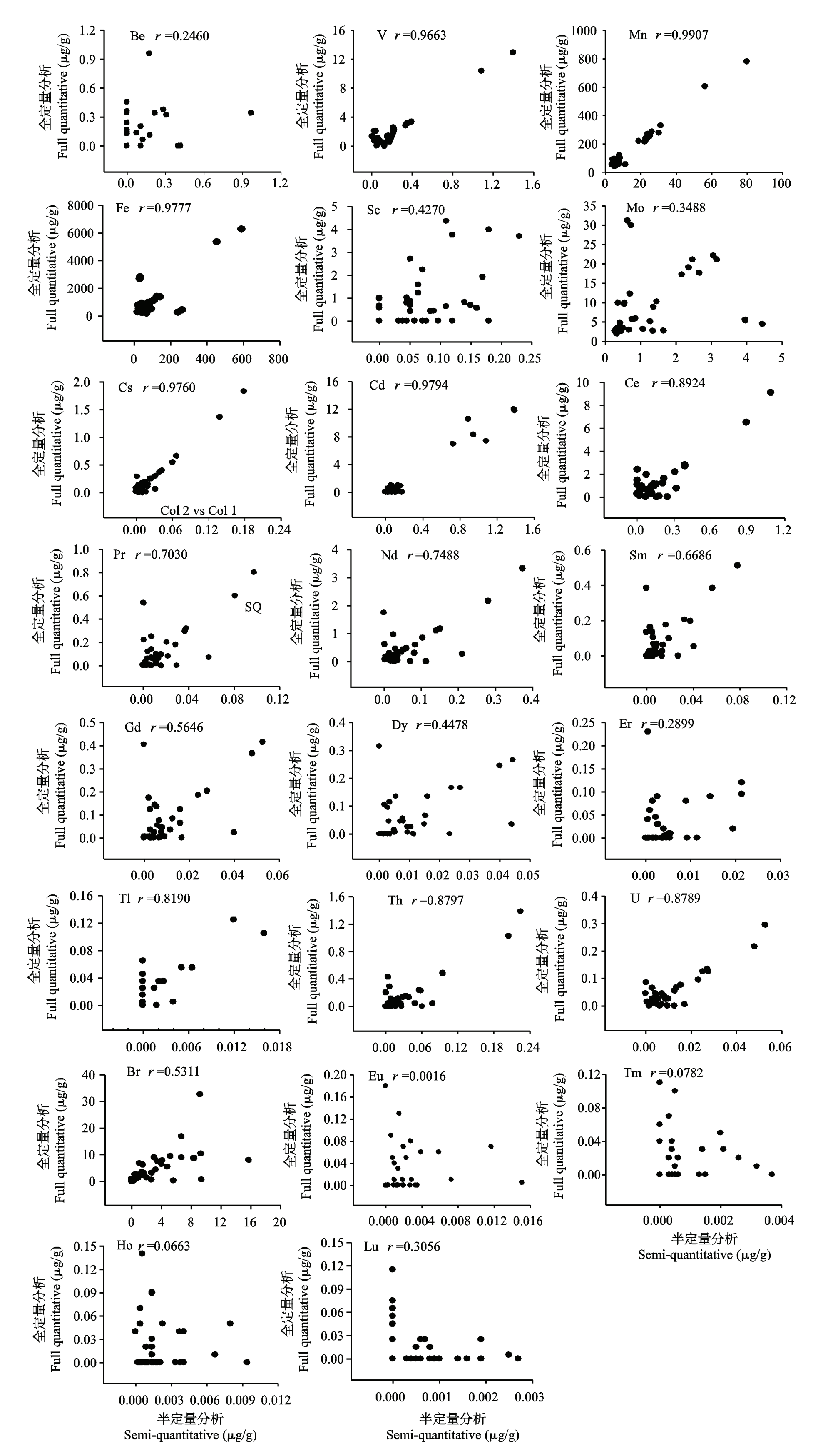


图 1 褐飞虱体内化学元素含量的半定量分析和全定量分析

Fig. 1 Semi-quantitative (SQ) and full quantitative (FQ) analysis of content of chemical elements in the brown planthopper, *Nilaparvata lugens*

(0.2460)，Tm(0.0782)，Ho(0.0663)和 Eu(0.0016)。从相关系数大小来看，元素含量越高，元素含量半定量测定和全定量测定相关性越大，半定量测定的准确性较好，如 Mn，Cd，Fe，Cs，V，Ce，Th 和 U 元素。Tl，Nd，Pr，Sm，Gd 和 Mo 元素相关趋势总体上是：半定量含量较高时，相关性较好。但含量较低时，半定量检测准确性偏低。另一些元素，如 Lu，Er，Be，Tm，Ho 和 Eu，半定量分析和全定量分析方法检测结果间相关性系数小，因此这些元素的半定量检测结果的准确性低。

3 讨论

为进行褐飞虱远距离迁飞虫源地的地理来源识别，确定具有地理特征的化学元素种类是至关重要的一步。本研究利用 ICP-MS 检测技术，结合半定量和全定量分析方法，经过巢式设计方差分析，确定元素 Ce，Nd，Pr，Sm，Gd，Th，Mn，V，Tl，Mo，Fe 和 Cs 可以作为判别不同地理种群褐飞虱体内化学元素种类。这 12 种元素在 2006 – 2008 年褐飞虱不同地理种群体间存在差异显著，即褐飞虱不同地理种群间显著性差异 P 值均小于 0.05，且年份间和重复丘块间差异不显著，这说明它们是具有很好的稳定性和重复性的地理特征元素。

相关分析表明，含量较大的元素应用 ICP-MS 半定量分析和全定量分析的结果基本一致，一般线性模型方差分析结果亦相似，这说明半定量分析有一定程度的准确度和可靠性。这样亦表明，先应用半定量分析确定褐飞虱体内含有哪些元素，并应用巢式设计方差分析，初步筛选主要元素，再进一步对这些初选出来的元素进行全定量分析进行检测，筛选出可用于褐飞虱不同地理种群识别的特征元素的技术过程是可行的。筛选出来的这些元素的含量在不同地理种群褐飞虱体内存在显著的差异，将这些元素作为识别褐飞虱种群地理来源的特征是可行的。

不同地理种群褐飞虱体内化学元素的差异可能是因成土母质不同所引起。成土母质是土壤形成的物质基础和植物矿质养分元素(氮除外)的最初来源，土壤的化学组成受成土母质的影响。由于不同的成土母质，土壤中的各个化学元素含量的差异很大程度上决定了寄主作物和昆虫体内的化学元素组分(Alloway，1995；Pendias and Pendias，2000；崔妍等，2005)。昆虫生物体内化学元素的组成是在其生长阶段中逐步形成的，它可能代表了昆虫所生存的地理环境的特征(Dempster *et al*.，1986)。昆虫体内的化学元素反映着其生长的地理环境，尤其是与土壤背景密切相关。褐飞虱是单食性害虫，主要在稻丛下部茎秆刺吸汁液，褐飞虱体内化学元素也与当地土壤种类有关。这也表明褐飞虱体内的化学元素可作为辨别其地理来源的指标。

本研究通过对褐飞虱不同地理种群体内的化学元素进行了电感耦合等离子体质谱分析，发现化学元素具有其各自典型的地理特征，且通过方差分析得出一些元素具有地域差异。探究褐飞虱不同地理种群体内化学元素差异性有助于褐飞虱远距离迁飞路径更深入的研究，可以用于褐飞虱远距离迁飞虫源地的“点对点”识别，即监测迁入虫源来自于哪个区域。这对开展褐飞虱虫源地的综合治理，降低虫源基数，减轻化学农药防治的压力，实现褐飞虱的生态综合治理具有重要意义。褐飞虱不同地理种群体内化学元素差异性也可用于探索害虫虫源地的某些生理生化特征，为农作物病虫的生态学治理提供理论基础。

致谢 本研究中褐飞虱样品的采集得到了浙江永康、福建福清、湖北潜江、湖南衡阳、江西万安及宜丰、广东韶关、广西永福、合浦、全州和玉林县(市)植保站帮助，在此致谢。

参考文献(References)

Alloway BJ，1995. Heavy Metals in Soils. 2nd ed. Blackie Academic and Professional，London. 11 – 37.

Anderson KA，Magnuson BA，Tschirgi ML，Smith B，1999. Determining the geographic origin of potatoes with trace metal analysis using statistical and neural network classifiers. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*，47(4)：1568 – 1575.

Aparicio R，1999. Characterization：Mathematical Procedures for Chemical Analysis. Aspen Publisher Incorporation，Maryland. 129 – 158.

Asahina S，Tsuruoka Y，1968. Records of the insects which visited a weather ship located at the ocean weather station “Tango” on the Pacific Ⅱ. *Kontyu*，36(2)：190 – 202.

Bao YX，Cheng JY，Cheng XN，Chu CS，Shen TL，2000. Dynamical numerical simulations of the northward shift of the brown planthopper，*Nilaparvata lugens* (Stål) during the midsummer in China. *Acta Entomologica Sinica*，43(2)：176 – 183. [包云轩，程极益，程遐年，储长树，沈桐立，2000. 中国盛夏褐飞虱北迁过程的动态数值模拟. 昆虫学报，43(2)：176 – 183]

Bao YX，Zhai BP，Cheng XN，2005. Numerical simulation of the migration parameters of the brown planthopper，*Nilaparvata lugens* (Stål). *Acta Entomologica Sinica*，25(5)：1107 – 1114. [包云

轩，翟保平，程遐年，2005. 褐飞虱迁飞参数的数值模拟. 生态学报，25(5)：1107－1114]

Chen SH, Wang SH, Zou YD, 1978. High altitude migratory observation of brown planthopper, *Nilarparvata lugens* (Stål). *Entomological Knowledge*, 15(6): 165－170. [陈世煌，王士槐，邹运鼎，1978. 褐飞虱的高空迁飞观察. 昆虫知识，15(6)：165－170]

Cheng XN, Zhang XX, Cheng JY, 1994. Radar observations on the autumn migration of *Nilarparvata lugens* (Homoptera: Delphacidae) in the east of China. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 17(3): 24－32. [程遐年，张孝羲，程极益，1994. 褐飞虱在中国东部秋季回迁的雷达观察. 南京农业大学学报，17(3)：24－32]

Cui Y, Ding YS, Gong WM, Ding DW, 2005. Study on the correlation between the chemical forms of the heavy metals in soil and the metal uptake by plant. *Journal of Dalian Maritime University*, 31(2): 59－63. [崔妍，丁永生，公维民，丁德文，2005. 土壤中重金属化学形态与植物吸收的关系. 大连海事大学学报，31(2)：59－63]

Dempster JP, Lakhani KH, Coward PA, 1986. The use of chemical composition as a population marker in insects: a study of the brimstone butterfly. *Ecological Entomology*, 11(1): 51－65.

Deng WX, 1981. Research on the brown planthopper and white-backed planthopper captured by airplane in China. *Pest Forecasting Reference*, (1): 1－6. [邓望喜，1981. 我国飞机捕捉褐飞虱及白背飞虱的研究. 病虫测报参考资料，(1)：1－6]

Devillers J, Doré JC, Marenco M, Poirier-Duchêne F, Galand N, Viel C, 2002. Chemometrical analysis of 18 metallic and nonmetallic elements found in honeys sold in France. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 50(21): 5998－6007.

Di Giacomo F, Del Signore A, Giaccio M, 2007. Determining the geographic origin of potatoes using mineral and trace element content. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 55(3): 860－866.

Fernández-Torres R, Pérez-Bernal JL, Bello-López MA, Callejón-Mochón CM, Jiménez-Sánchez JC, Guiraúm-Pérez GA, 2005. Mineral content and botanical origin of Spanish honeys. *Talanta*, 65(3): 686－691.

Franke BM, Gremaud G, Hadorn R, Kreuzer M, 2005. Geographic origin of meat－elements of an analytical approach to its authentication. *European Food Research and Technology*, 221(3－4): 493－503.

Heaton K, Kelly SD, Hoogewerff J, Woolfe M, 2008. Verifying the geographical origin of beef: the application of multi-element isotope and trace element analysis. *Food Chemistry*, 107(1): 506－515.

Kelly S, Baxter M, Chapman S, Rhodes C, Dennis J, Brereton P, 2002. The application of isotopic and elemental analysis to determine the geographical origin of premium long grain rice. *European Food Research and Technology*, 214(1): 72－78.

Lamble K, Hill SJ, 1995. Determination of trace metals in tea using both microwave digestion at atmospheric pressure and inductively coupled plasma atomic emission spectrometry. *Analyst*, 120(2): 413－417.

Liu HG, Liu ZJ, Zhu WH, 1983. Results of net-trapping of brown planthoppers on China seas. *Acta Entomologica Sinica*, 26(1): 109－113. [刘浩光，刘振杰，祝为华，1983. 我国海上网捕褐飞虱的结果. 昆虫学报，26(1)：109－113]

Marcos A, Fisher A, Rea G, Hill SJ, 1998. Preliminary study using trace element concentrations and a chemometrics approach to determine the geographical origin of tea. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 13(6): 521－525.

Moreda-Piñeiro AM, Fisher A, Hill SJ, 2003. The classification of tea according to region of origin using pattern recognition techniques and trace metal data. *Journal of Food Composition Analysis*, 16(2): 195－211.

Nozal Nalda MJ, Bernal Yague JL, Diego Calva JC, Martin Gomez MT, 2005. Classifying honeys from the Soria Province of Spain via multivariate analysis. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 382(2): 311－319.

Pendias AK, Pendias H, 2000. Trace Elements in Soils and Plants. 3rd ed. CRC Press, Florida. 432 pp.

Pisani A, Protano G, Riccobono F, 2008. Minor and trace elements in different honey types produced in Siena County (Italy). *Food Chemistry*, 107(14): 1553－1560.

Rivero RC, Hernández PS, Rodríguez EM, Martín JD, Romero CD, 2003. Mineral concentrations in cultivars of potatoes. *Food Chemistry*, 83(2): 247－253.

Sacco D, Brescia MA, Buccolieri A, Jambrenghi AC, 2005. Geographical origin and breed discrimination of Apulian lamb meat samples by means of analytical and spectroscopic determinations. *Meat Science*, 71(3): 542－548.

Szefer P, Nriagu JO, 2007. Mineral Components in Foods. CRC Press, Florida. 480 pp.

Tang QY, 2010. Data Processing System－Experimental Design, Statistical Analysis and Data Mining. 2nd ed. Science Press, Beijing. 130－143. [唐启义，2010. DPS 数据处理系统——实验设计、统计分析及数据挖掘(第 2 版). 北京：科学出版社. 130－143]

Tuzen M, Silici S, Mendil D, Soylak M, 2007. Trace element levels in honeys from different regions of Turkey. *Food Chemistry*, 103(2): 325－330.

Yasui A, Shindoh K, 2000. Determination of the geographic origin of brown rice with trace element composition. *Bunseki Kagaku*, 49(6): 405－410.

Zhang CD, 1980. First catch of brown planthopper, *Nilaparvata lugens* (Stål) marked at Guangxi province. *Jiangxi Agricultural Science and Technology*, 5(8): 14－15. [张灿东，1980. 我省首次捕到从广西标放的褐稻虱. 江西农业科技，5(8)：14－15]

(责任编辑：武晓颖)